

держки возникновения проводимости за ударным фронтом нормальной детонации и периода индукции химической реакции за фронтом инициирующей ударной волны.

Поступила в редакцию  
12/X 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. R. Travis. Fourth Symposium (International) on Detonation, Washington, 1965, p. 609.
2. J. Morvan, H. Pujols. Fifth Symposium (International) on Detonation, California, 1970, p. 429.
3. Ю. Н. Тюняев, А. Г. Иванов, В. Н. Минеев. ФГВ, 1976, 12, 1.
4. R. F. Chaiken. J. Chem. Phys., 1960, 33, 760.
5. А. Н. Дремин, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
6. А. Г. Антипенко, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1975, 11, 3.
7. А. Н. Дремин, О. К. Розанов и др. ФГВ, 1967, 3, 1.
8. Compendium of shock wave data. Univ. Calif., 1966.
9. F. E. Allison. J. Appl. Phys., 1965, 36, 7.
10. А. Г. Антипенко, С. С. Набатов, В. В. Якушев. ФГВ, 1975, 11, 3.
11. С. С. Набатов, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ФГВ, 1976, 12, 2.
12. В. В. Якушев, О. К. Розанов, А. Н. Дремин. ЖЭТФ, 1968, 54, 2.
13. С. С. Набатов, В. В. Якушев, А. Н. Дремин. ФГВ, 1975, 11, 2.
14. B. Hayes. Tenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, 1965, p. 869.
15. A. N. Dremin, V. V. Yakushev. Acta Astronautica, 1974, 1.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТРОЙНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

*Ю. А. Николаев, М. Е. Топчиян, В. Ю. Ульяницкий*

*(Новосибирск)*

До настоящего времени расчеты с учетом химического равновесия для спиновой детонации в плоской модели с поперечной волной проведены только для смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2$  [1, 2]. Схема течения, соответствующая указанной модели, изображена на рис. 1. Здесь скачки  $AA_1$  и  $BC$  детонационные, а остальные ударные. Исходные данные для расчета — экспериментально определяемые угол  $\varphi$  при скачке  $AA_2$  и полная скорость невозмущенного потока  $u_{00}$ .

Описанная в [3] методика машинного расчета равновесных детонационных волн позволяет при некотором усложнении программы [4] сделать расчеты тройных конфигураций для любых смесей, а также проанализировать, какое влияние на результаты оказывают возможные погрешности определения исходных величин ( $\varphi_{AA_2}$ ,  $u_{00}$ ).

Для получения исходных данных в трубе диаметром  $d=21$  мм при  $T_0=293$  К измерена продольная скорость детонационной волны с помощью фоторегистратора, получены следовые отпечатки для определения полной скорости движения потока и ее направления в системе координат, связанной с «головой» спина, получены также теплеровские

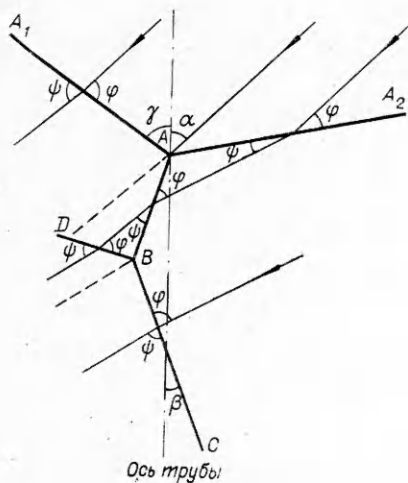


Рис. 1.

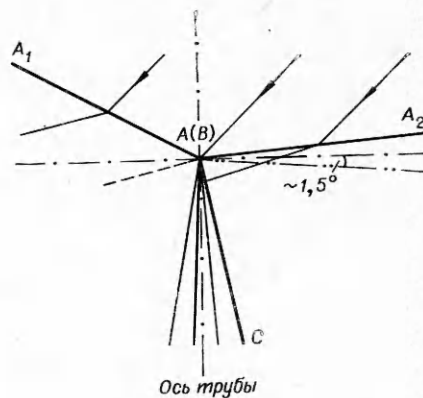


Рис. 2.

фотографии «головы» методом полной компенсации для установления угла наклона волны  $AA_2$ , а также для измерения других углов с целью сравнения с результатами расчета. Методика этих экспериментов хорошо известна [2]. Для расчета детонации в смеси  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  привлечены экспериментальные данные из [5].

Результаты расчетов параметров спиновой структуры для пяти различных смесей приведены в табл. 1, где  $p_0$  — начальное давление;  $D$  — расчетная скорость детонации Чепмена — Жуге;  $u_0$  — измеренная скорость детонации;  $u_{00}$  — полная скорость невозмущенного потока. Обозначения и отсчет углов указаны на рис. 1. В табл. 2 приведено сравнение полученных экспериментальных данных с расчетом.

Ошибки измерений  $u_{00}$  не превышали  $\pm 4\%$ , угла  $\varphi_{AA_2}$  —  $\pm 2,4^\circ$ . Для некоторых смесей дополнительную погрешность вносит нестационарность движения «головы» спина, связанная с его неустойчивостью [6]. Траектории движения «головы» спина без изломов наблюдались только для состава  $2\text{CO} + \text{O}_2 + 5\% \text{N}_2$ . Для остальных смесей величина угла наклона траектории относительно оси трубы, полученная в результате осреднения на длине больше одного периода обращения, отличалась от полученной в результате осреднения на характерном масштабе возмущения траектории не более чем на  $+4 \div -8^\circ$ . Подобные возмущения, как указывалось в [4, 6], возникают примерно через 0,65 шага спирали и сосредоточены на  $25 \div 30\%$  длины периода. Влияние этих погрешностей для всех исследованных смесей было проверено расчетом, в котором варьировались полная скорость невозмущенного потока и угол  $\varphi_{AA_2}$ .

В табл. 3 представлены результаты расчета для смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  ( $p_0 = 0,06315$  атм,  $\alpha = 41^\circ$ ;  $u_0 = 2688$  м/с,  $u_{00} = 4249$  м/с); для других составов результаты аналогичны.

Как видно из приведенных таблиц, схема течения для всех исследованных смесей качественно сохраняется, в частности, поперечная волна  $BC$  всегда пересжата, течение за ней дозвуковое. В связи с этим следует отметить несостоятельность предлагаемой в [7] схемы спиновой структуры (рис. 2), в которой волна  $AB$  отсутствует, а течение за ней и скачком  $AA_1$  согласуется с помощью центрированной волны разрежения. Анализ течения в окрестности тройной точки  $A$  показывает, что при углах наклона волны  $AA_2$ , близких к экспериментальным, стационарная нормальная к потоку волна Чепмена — Жуге невозможна. Как показывает расчет с учетом химического равновесия (авторами [7] такой расчет не производился), такая поперечная волна возможна

Т а б л и ц а 1

| Смесь   | Скачок | $p/p_0$ | $T, K$ | $\rho/\rho_0$ | $M$   | $u, m/c$ | $\varphi, \text{град}$ | $\psi, \text{град}$ |
|---|--------|---------|--------|---------------|-------|----------|------------------------|---------------------|
| $2CO + O_2 + 5\% H_2$ ,<br>$p_0 = 0,105 \text{ атм}$ , $\alpha = 45^\circ$ , $D = 1760 \text{ м/с}$ ,<br>$u_0 = 2404 \text{ м/с}$ , $u_0 = 1700 \text{ м/с}$          | $AA_2$ | 16,8    | 1052   | 4,77          | 3,141 | 2022     | 33,6                   | 7,9                 |
|   | $AA_1$ | 52,6    | 3535   | 4,77          | 0,467 | 513      | 87,6                   | 78,9                |
|   | $AB$   | 52,6    | 1437   | 19,85         | 2,371 | 1770     | 32,5                   | 15,5                |
|   | $BC$   | 164,2   | 3713   | 14,47         | 0,602 | 670      | 92,4                   | 97,3                |
|   | $BD$   | 164,2   | 1942   | 25,05         | 1,569 | 1355     | 45,5                   | 23,8                |
| $2H_2 + O_2$ ,<br>$p_0 = 0,0631 \text{ атм}$ , $\alpha = 47^\circ$ ,<br>$D = 2688 \text{ м/с}$ , $u_0 = 3812 \text{ м/с}$ ,<br>$u_0 = 2600 \text{ м/с}$               | $AA_2$ | 12,7    | 891    | 4,25          | 3,708 | 3398     | 27,8                   | 7,0                 |
|   | $AA_1$ | 57,7    | 3581   | 5,14          | 0,437 | 742      | 89,8                   | 89,0                |
|   | $AB$   | 57,7    | 439    | 11,95         | 2,544 | 2930     | 32,8                   | 12,9                |
|   | $BC$   | 187,6   | 3806   | 16,10         | 0,521 | 898      | 90,5                   | 92,8                |
|   | $BD$   | 187,6   | 1996   | 28,00         | 1,727 | 2320     | 42,4                   | 21,3                |
| $2H_2 + O_2 + 3Ar$ ,<br>$p_0 = 0,0526 \text{ атм}$ , $\alpha = 46^\circ$ ,<br>$D = 1816 \text{ м/с}$ , $u_0 = 2231 \text{ м/с}$ ,<br>$u_0 = 1550 \text{ м/с}$         | $AA_2$ | 13,1    | 1038   | 3,76          | 2,691 | 1875     | 34,2                   | 10,2                |
|   | $AA_1$ | 39,1    | 3276   | 3,73          | 0,519 | 606      | 87,4                   | 80,3                |
|   | $AB$   | 39,1    | 1513   | 7,70          | 1,907 | 1592     | 37,3                   | 20,4                |
|   | $BC$   | 90,2    | 3374   | 8,49          | 0,709 | 831      | 89,2                   | 88,1                |
|   | $BD$   | 90,2    | 1978   | 13,58         | 1,310 | 1242     | 49,4                   | 33,5                |
| $C_2H_2 + 1,5O_2 + 12,5Ar$ ,<br>$p_0 = 0,0592 \text{ атм}$ , $\alpha = 49^\circ$ ,<br>$D = 1637 \text{ м/с}$ , $u_0 = 2133 \text{ м/с}$ ,<br>$u_0 = 1400 \text{ м/с}$ | $AA_2$ | 13,1    | 1974   | 3,64          | 3,206 | 1884     | 29,2                   | 8,7                 |
|   | $AA_1$ | 52,5    | 3725   | 3,77          | 0,479 | 565      | 89,5                   | 88,0                |
|   | $AB$   | 52,5    | 1799   | 8,70          | 2,117 | 1597     | 35,7                   | 16,7                |
|   | $BC$   | 137,6   | 3831   | 9,72          | 0,595 | 705      | 89,4                   | 87,4                |
|   | $BD$   | 137,6   | 2494   | 16,46         | 1,416 | 1257     | 46,6                   | 29,2                |
| $CH_4 + 2O_2$ ,<br>$p_0 = 0,289 \text{ атм}$ , $\alpha = 46^\circ$ ,<br>$D = 2335 \text{ м/с}$ , $u_0 = 3023 \text{ м/с}$ ,<br>$u_0 = 2100 \text{ м/с}$               | $AA_2$ | 31,3    | 1301   | 7,16          | 3,501 | 2436     | 36,7                   | 5,9                 |
|   | $AA_1$ | 75,4    | 3873   | 4,25          | 0,544 | 776      | 83,9                   | 65,7                |
|   | $AB$   | 75,3    | 1518   | 14,80         | 3,012 | 2255     | 25,6                   | 13,1                |
|   | $BC$   | 240,6   | 4054   | 13,49         | 0,935 | 1331     | 98,8                   | 106,3               |
|   | $BD$   | 240,6   | 1868   | 38,40         | 2,310 | 1910     | 35,2                   | 15,2                |

лишь при отрицательном (около  $1,5^\circ$ ) угле наклона волны  $AA_2$  к поперечному сечению, что противоречит эксперименту.

Табл. 4 иллюстрирует результаты точного расчета течения за волной  $AA_2$  для исходных данных, взятых из [7].

Т а б л и ц а 2

| Смесь                   | $\beta, \text{град}$ | $\gamma, \text{град}$ |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| $2CO + O_2 + 5\% H_2$   | 22,4                 | 47,5                  |
|                         | $22,2 \pm 2,2$       | $45,2 \pm 2,4$        |
| $2H_2 + O_2$            | 22,2                 | 43,2                  |
|                         | $14,2 \pm 2,2$       | $51,2 \pm 2,4$        |
| $2H_2 + O_2 + 3Ar$      | 19,2                 | 46,5                  |
|                         | $19,5 \pm 2,2$       | $47,2 \pm 3,3$        |
| $2C_2H_2 + 3O_2 + 25Ar$ | 19,5                 | 41,5                  |
|                         | $17,4 \pm 2,2$       | $51 \pm 2,2$          |

П р и м е ч а н и е. Верхние значения соответствуют расчету, нижние — эксперименту.

Здесь приведены значения полной скорости потока за фронтом  $AA_2$  и скорости волны Чепмена — Жуге по состоянию за  $AA_2$ . Полная скорость потока за этим скачком больше скорости Чепмена — Жуге, поэтому нормальная к потоку стационарная детонационная волна по состоянию за  $AA_2$  пересжата. Пересжатие по скорости составляет 9—16%, по давлению за волной  $AC$  60 и 100%. Поток за такой волной дозвуковой ( $M \approx 0,3$ ), и,

Таблица 3

| Скачок          | $p/p_0$ | M    | $\Phi$ , град | $\Psi$ , град | Скачок | $p/p_0$ | M    | $\Phi$ , град | $\Psi$ , град |
|-----------------|---------|------|---------------|---------------|--------|---------|------|---------------|---------------|
| AA <sub>2</sub> | 9,9     | 4,66 | 21,8          | 5,8           | BC     | 248,2   | 0,43 | 89,3          | 86,4          |
|                 | 15,8    | 3,84 | 27,8          | 6,5           |        | 264,1   | 0,46 | 90,7          | 93,3          |
|                 | 20,3    | 3,40 | 31,8          | 7,1           |        | 261,5   | 0,48 | 91,7          | 97,1          |
| AA <sub>1</sub> | 74,3    | 0,39 | 91,3          | 98,4          | BD     | 248,2   | 1,99 | 38,2          | 18,2          |
|                 | 74,3    | 0,39 | 89,7          | 88,3          |        | 264,1   | 1,76 | 42,6          | 20,2          |
|                 | 74,3    | 0,39 | 88,7          | 82,2          |        | 261,5   | 1,59 | 46,0          | 22,5          |
| AB              | 74,3    | 2,81 | 33,1          | 10,2          |        |         |      |               |               |
|                 | 74,4    | 2,65 | 32,0          | 12,2          |        |         |      |               |               |
|                 | 74,3    | 2,48 | 32,0          | 14,1          |        |         |      |               |               |

Таблица 4

| Смесь   | Вариант                | M <sub>0</sub> | $\Phi$ | Полная скорость газа за AA <sub>2</sub> , м/с | Скорость изменения температуры по состоянию за AA <sub>2</sub> , м/с | Пересжатие  |             | Число Маха за волной AC |
|---|------------------------|----------------|--------|---|--|-------------|-------------|-------------------------|
|   |                        |                |        |   |  | по скорости | по давлению |                         |
| 2CO+O <sub>2</sub>  | AA <sub>1</sub> (уд.)  | 7,1            | 37°01' | 1950  | 1691   | 1,153       | 1,97        | 0,30                    |
|   | AA <sub>1</sub> (дег.) | 7,1            | 36°40' | 1958  | 1692   | 1,157       | 1,99        | 0,30                    |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +<br>+10%O <sub>2</sub> +<br>+83,3%Ar | AA <sub>1</sub> (уд.)  | 6,7            | 36°48' | 1756  | 1610   | 1,091       | 1,64        | 0,35                    |
|   | AA <sub>1</sub> (дег.) | 6,7            | 29°15' | 1860  | 1619   | 1,149       | 1,95        | 0,30                    |

следовательно, центрированная волна разрешения здесь невозможна.

Для согласования течений за пересжатой поперечной волной и фронтом AA<sub>1</sub> необходимо введение второй тройной точки, наличие которой наиболее наглядно подтверждено голографической съемкой [8].

Поступила в редакцию  
24/1 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. ПМТФ, 1962, 3.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. «Наука», 1963.
3. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчийн. ФГВ, 1977, 13, 3.
4. М. Е. Топчийн. Докт. дис., Институт гидродинамики, Новосибирск, 1974.
5. В. И. Манжалей, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5.
6. М. Е. Топчийн, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1976, 12, 2.
7. С. К. Асланов, П. И. Копейка.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. В. Е. Гордеев. Докл. АН СССР, 1974, 215, 3.